

⑮ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ Patentschrift  
⑪ DE 3611336 C2

⑤ Int. Cl. 4:  
G01L 1/22  
G 01 L 3/14

⑰ Aktenzeichen: P 36 11 336.0-52  
⑱ Anmeldetag: 4. 4. 86  
⑲ Offenlegungstag: 15. 10. 87  
⑳ Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 11. 2. 88

DE 3611336 C2

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

⑦③ Patentinhaber:  
Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft-  
und Raumfahrt eV, 5300 Bonn, DE

⑦④ Vertreter:  
von Kirschbaum, A., Dipl.-Ing., Pat.-Anw., 8034  
Germering

⑦② Erfinder:  
Dietrich, Johannes, Dipl.-Ing.: Schott, Jörg.  
Dipl.-Ing., 8031 Gilching, DE

⑤⑥ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit  
in Betracht gezogene Druckschriften:

DE 32 38 951 A1  
DE 27 27 704 A1  
EP 01 17 334 A2

⑤④ Kraft-Drehmoment-Fühler

DE 3611336 C2

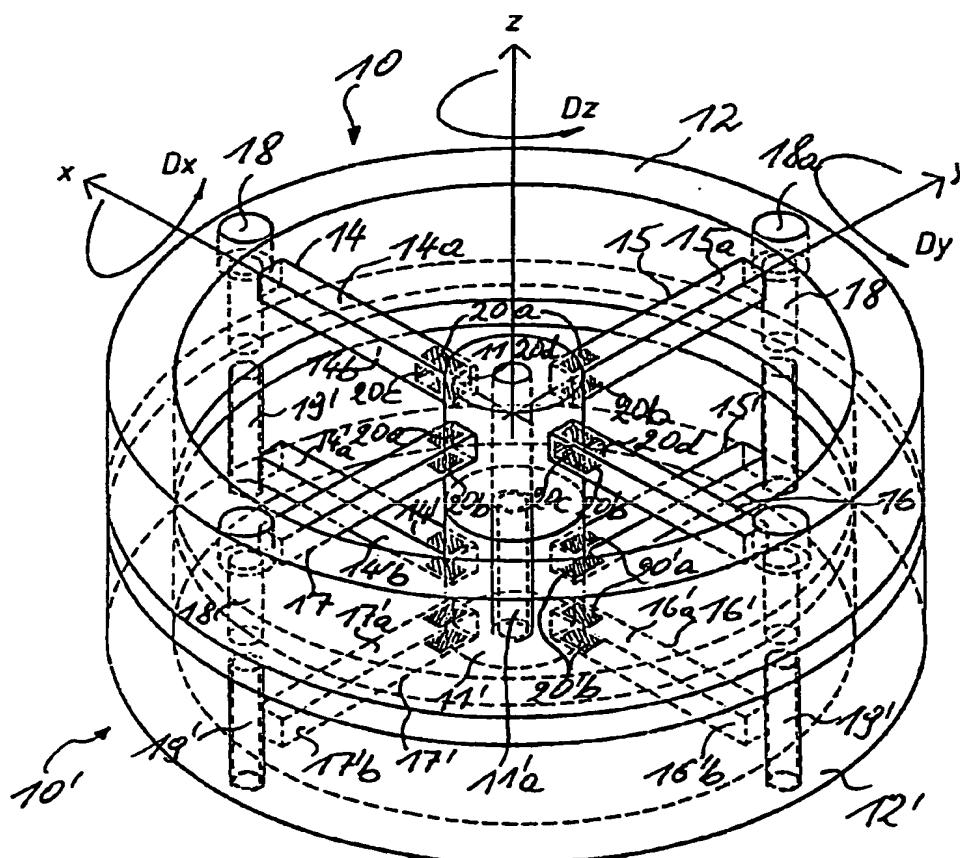


Fig. 1

## Patentansprüche

1. Kraft-Drehmoment-Fühler zum Messen von sechs Kraft- und Drehmoment-Komponenten im kartesischen Koordinatensystem, aus zwei Speichenrädern mit starrem zylindrischem Außenring und je einer in sich starren, zylindrischen Nabe, wobei Außenring und Naben jeweils durch in einer Ebene liegende Speichen miteinander verbunden sind, und wobei auf einander gegenüberliegenden Speichenoberflächen eines Speichenrades, welche in sich senkrecht zur Fühler-Mittelnachse (Z-Achse) erstreckenden, zueinander parallelen (XY)-Ebenen liegen, sowie auf dazu senkrechten, einander gegenüberliegenden Oberflächen des anderen Speichenrades jeweils paarweise Dehnungsmeßstreifen aufgebracht sind, dadurch gekennzeichnet, daß die Speichen (14 bis 17, 14' bis 17') beider Speichenräder (10, 10') alle den gleichen, quadratischen Querschnitt aufweisen und genau übereinander angeordnet sind, und daß auf allen sich senkrecht zur Mittelnachse (Z-Achse) erstreckenden Ebenen liegenden Speichenoberflächen (14a, 14b bis 17'a, 17'b) beider Speichenräder (10, 10') sowie auf dazu senkrechten, einander gegenüberliegenden Oberflächen eines diagonalen Speichenpaares (14, 16) eines der beiden Speichenräder die paarweise angeordneten Dehnungsmeßstreifen (20a, 20b; 20'a, 20'b bzw. 20c, 20d) nahe der Naben aufgebracht sind.

2. Kraft-Drehmoment-Fühler nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zur Erhöhung der Steifigkeit und damit der maximalen Belastbarkeit in der Mitte zwischen den mit Dehnungsmeßstreifen (20a, 20b; 20'a, 20'b) versehenen Speichen (14 bis 17, 14' bis 17') in derselben Ebene jedes Speichenrades (10, 10') nochmals die gleiche Anzahl Speichen vorgesehen ist.

3. Kraft-Drehmoment-Fühler nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß alle in derselben Ebene liegenden Speichen (14 bis 17, 14' bis 17') jedes Speichenrades (10, 10') in Richtung der Z-Achse zu einem Ende der jeweiligen Nabe (11, 11') hin so versetzt sind, daß bei fester, starrer Verbindung der beiden Naben (11, 11') die neutralen Ebenen der Speichen (14 bis 17, 14' bis 17') in einem Abstand voneinander angeordnet sind, welcher gleich dem Durchmesser der starren Naben (11, 11') ist.

4. Kraft-Drehmoment-Fühler nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Speichenräder (10, 10') jeweils Scheiben aus Aluminium oder Stahl sind, die von gezogenem Stangenmaterial abgeschnitten sind, anschließend beidseitig einer Drehbearbeitung und danach auf einer Seite einer Fräsbearbeitung unterzogen sind.

5. Kraft-Drehmoment-Fühler nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Naben (11, 11') profiliert ausgebildet sind, und daß ein Trägerfilm, auf welchem vier bis sechs Dehnungsmeßstreifen (20a, 20b; 20c, 20d; bzw. 20'a, 20'b; 20'c, 20'd) entsprechende den Speichen (14 bis 17; 14' bis 17') ausgerichtet angeordnet sind, in der Mitte eine dem Nabenprofil entsprechende Ausnehmung aufweist, so daß der Trägerfilm mit den vier bis sechs Dehnungsmeßstreifen nach deren Ausrichtung bezüglich einer Nabe (10, 10') vorzugsweise mittels eines entsprechend geformten

Stempels in einem Arbeitsgang sich selbstzentrierend auf die vorzugsweise mit Klebstoff versehenen Speichen (14 bis 17; 14' bis 17') aufbringbar ist.

6. Kraft-Drehmoment-Fühler nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zur Signalverarbeitung alle von den Dehnungsmeßstreifen (20a, 20b; 20'a, 20'b; 20c, 20d) gelieferten und von Null abweichenden Spakungen, wenn auf den Fühler (1') keine Kräfte und Drehmomente wirken, als in der Größe temperaturabhängige Fehlerspannungen zusätzlich zu der Meßgröße Temperatur fortlaufend im späteren Betriebstemperaturbereich in einem Kalibriervorgang erfaßt und gespeichert werden, und daß bei späterem Meßbetrieb die zur herrschenden Temperatur gehörenden Fehlerspannungen aus dem Speicher abgerufen und von den tatsächlichen Meßspannungen subtrahiert werden.

7. Kraft-Drehmoment-Fühler nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß der Fehler aufgrund einer temperaturabhängigen Änderung des k-Faktors der Dehnungsmeßstreifen (20a, 20b; 20'a, 20'b; 20c, 20d) entsprechend der vom Hersteller angegebenen Dehnungsmeßstreifen-Charge oder einem zusätzlichen Kalibriervorgang ebenfalls gespeichert und entsprechend der gemessenen Temperatur als multiplikativer Faktor in eine zusätzliche Kompensationsrechnung aufgenommen wird.

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft einen Kraft-Drehmoment-Fühler zum Messen von sechs Kraft- und Drehmoment-Komponenten im kartesischen Koordinatensystem nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

In EP 1 17 334 ist ein Kraft-Drehmoment-Fühler beschrieben, welcher aus zwei einteiligen Speichenrädern mit einem einzigen starren, zylindrischen Außenring und je einer starren, zentralen Nabe, welche durch vier in einer Ebene liegende Speichen mit Flachprofil mit dem Außenring verbunden sind, gebildet ist. Hierbei sind die Flachprofile der Speichen bei dem einen Speichenrad waagrecht und bei dem anderen Speichenrad senkrecht angeordnet. Ferner sind bei dem bekannten Kraft-Drehmoment-Fühler auf den gegenüberliegenden Oberflächen aller Speichen jeweils paarweise Dehnungsmeßstreifen aufgebracht, d. h., bei dem einen Speichenrad sind die Dehnungsmeßstreifen auf den einander gegenüberliegenden Speichenoberflächen aufgebracht, welche in sich senkrecht zur Fühler-Mittelnachse (Z-Achse) erstreckenden, zueinander parallelen (X,Y)-Ebenen liegen, und bei dem anderen Speichenrad sind sie auf den hierzu senkrechten, einander gegenüberliegenden Oberflächen aufgebracht. Obendrein sind die gleichartig aufgebauten Speichenräder bei dem bekannten Kraft-Drehmoment-Fühler um 45° gegeneinander verdreht über einander angeordnet.

Nachteilig bei diesem bekannten Kraft-Drehmoment-Fühler ist dessen komplizierte Herstellung und die dadurch bedingten hohen Fertigungskosten. Ferner ist auch das im allgemeinen nur manuell mögliche Aufkleben sowie das anschließende separate Verdrahten von insgesamt 16 Dehnungsmeßstreifen verhältnismäßig kompliziert und damit zeitaufwendig.

Dieselben Nachteile hinsichtlich hoher Fertigungskosten bei der Herstellung eines als Fühler verwendeten Biegekörpers und für das manuelle Aufkleben und anschließende separate Verdrahten von ebenfalls minde-

stens 16 Dehnungsmeßstreifen sind bei einem aus der DE 27 27 704 bekannten Kraft-Drehmoment-Fühler anzutreffen. Obendrein muß bei diesem Fühler den Dehnungsmeßstreifen auch noch eine aufwendige, hochempfindliche Verstärkerelektronik nachgeschaltet sein.

Aufgabe der Erfindung ist es daher, einen besonders einfach herzustellenden, hochgenauen Kraft-Drehmoment-Fühler zu schaffen, welcher auf ihn einwirkende Kräfte in Biegungen einzelner Elemente umsetzt, was dann mittels Dehnungsmeßstreifen erfaßt wird.

Gemäß der Erfindung ist dies bei einem Kraft-Drehmoment-Fühler nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1 durch die Merkmale im kennzeichnenden Teil des Anspruchs 1 gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind Gegenstand der Unteransprüche.

Bei dem Kraft-Drehmoment-Fühler gemäß der Erfindung weisen die Speichen beider Speichenräder alle den gleichen, quadratischen Querschnitt auf und sind genau übereinanderliegend angeordnet. Ferner sind bei beiden Speichenrädern auf allen Speichenoberflächen, die in senkrecht zur Mittelnachse verlaufenden Ebenen liegen, paarweise angeordnete Dehnungsmeßstreifen aufgebracht, während nur auf den hierzu senkrechten, einander gegenüberliegenden Oberflächen eines diagonalen Speichenpaares eines der beiden Speichenräder entsprechende, paarweise angeordnete Dehnungsmeßstreifen aufgebracht sind. Das heißt, bei dem erfindungsgemäßen Meßfühler sind insgesamt 20 Dehnungsmeßstreifen aufgebracht, mit deren Hilfe dann jeweils drei Kraft- und Drehmoment-Komponenten im kartesischen Koordinatensystem erfaßt werden können, während bei dem aus der EP 1 17 334 bekannten Meßfühler prinzipbedingt nur insgesamt maximal vier Kraft-Drehmoment-Komponenten erfaßt werden können.

Somit ist durch die Erfindung ein ganz spezieller Meßkörper geschaffen, bei welchem die auf ihn einwirkenden Kräfte in den einzelnen Elementen in Biegungen umgesetzt werden. Die beiden an ihren Naben verbundenen Speichenräder können vorzugsweise in der Weise einfach hergestellt werden, daß Scheiben aus Aluminium oder aus Stahl von gezogenem Stangenmaterial abgeschnitten werden und dann beidseitig einer Drehbearbeitung unterzogen werden. Anschließend braucht dann nur noch eine Seite einer Fräsbearbeitung unterzogen werden, worauf das Speichenrad in seiner Grundausführung bereits fertiggestellt ist.

Um die insgesamt 20 Dehnungsmeßstreifen in vorteilhafter Weise einfach und in kurzer Zeit aufzubringen, weisen die miteinander verbundenen Naben der Speichenräder ein Profil, beispielsweise in Form einer Abflachung eines sonst runden Querschnitts, in Form einer polygonalen Außenfläche oder aber auch in Form von Einkerbungen auf.

Um dann jeweils vier bis maximal sechs Dehnungsmeßstreifen auf den drei, vorzugsweise vier Speichen eines jeden Speichenrades aufbringen zu können, sind die Dehnungsmeßstreifen entsprechend ausgerichtet auf einem Trägerfilm aufgebracht, welcher in seiner Mitte eine dem Nabenprofil entsprechende Ausnehmung aufweist. Aufgrund der dem Nabenprofil angepaßten Ausnehmung in der Mitte des Trägerfilms zentriert sich dieser beispielsweise beim Aufkleben auf ein Speichenrad von selbst und kann dann in einem Arbeitsgang mittels eines entsprechend geformten Stempels auf die beispielsweise mit Klebstoff versehenen Speichen aufgebracht werden.

Hierbei können die auf den Seitenflächen des diagonalen Speichenpaares aufzubringenden Dehnungsmeß-

streifen entweder mit Hilfe desselben, entsprechend ausgeführten Stempels in demselben Arbeitsgang aufgebracht werden, oder sie können beispielsweise von Hand angedrückt werden, nachdem die übrigen Dehnungsmeßstreifen auf den in einer Ebene liegenden Oberflächen der drei, vorzugsweise vier Speichen aufgeklebt sind. Die Genauigkeit, mit welcher die Dehnungsmeßstreifen auf den verschiedenen Flächen der Speichen aufgebracht werden, hängt somit nur noch davon ab, wie genau der Trägerfilm mit den auf ihm untergebrachten Dehnungsmeßstreifen gefertigt ist und wie genau die selbstzentrierend wirkende Ausnehmung ausgebildet ist.

Somit können aufgrund der vorteilhaften Ausbildung der beiden, vollkommen identischen, den Fühler bildenden Speichenräder die einzelnen Dehnungsmeßstreifen positionsgenau mit sehr niedrigen Fertigungskosten aufgebracht werden, da die Meßstellen zum Erfassen der einzelnen Biegeverformungen vorzugsweise nahe bei den beiden Naben liegen.

Obendrein entfällt bei dem erfindungsgemäßen Kraft-Drehmoment-Fühler die arbeitsaufwendige und damit kostenintensive Verdrahtungsarbeit der einzelnen Dehnungsmeßstreifen, da diese auf dem Trägerfilm ähnlich wie auf einer flexiblen, gedruckten Leiterplatte verbunden sind. Nach einem Aufkleben der insgesamt vier Trägerfilme, d. h. nach dem positionsgenauen Aufbringen von insgesamt 20 Dehnungsmeßstreifen, werden die beiden Speichenräder an ihren Naben fest und starr miteinander verbunden.

Anschließend werden dann die vier in vier Ebenen übereinanderliegenden, die Dehnungsmeßstreifen tragenden Filme durch ein einfaches Durchstecken von Drähten endverdrahtet. Je nach der Größe des Fühlers kann sogar die Elektronikplatine zwischen den Speichenrädern oder in Verlängerung einer der Naben des Fühlers angebracht werden. Bei einem Verdrahten der vier Trägerfilme kann dann sogar in dem gleichen Arbeitsgang die die Elektronik tragende Platine mit angeschlossen werden.

Um die Steifigkeit der einzelnen Speichenräder und um dadurch gleichzeitig deren maximale Belastbarkeit zu erhöhen, kann gemäß einer bevorzugten Ausführungsform jeweils in der Mitte zwischen den mit Dehnungsmeßstreifen versehenen Speichen in derselben Ebene jedes Speichenrads nochmals die gleiche Anzahl Speichen vorgesehen werden. Das bedeutet, daß bei dieser steiferen und höher belastbaren Ausführungsform eines Kraft- und Drehmoment-Fühlers in zwei Ebenen sechs, vorzugsweise acht Speichen ausgebildet sind. Auch ein solches Speichenrad kann in der vorstehend beschriebenen Weise aus einer von Stangenmaterial abgeschnittenen Scheibe hergestellt werden und in zwei Drehbearbeitungen und einer anschließenden Fräsbearbeitung im wesentlichen fertiggestellt werden.

Besonders vorteilhaft ist bei dem erfindungsgemäßen Kraft-Drehmoment-Fühler, daß sich an jeder Speiche der an ihren Naben fest und starr miteinander verbundenen Speichenräder zur Messung einer Biegeverformung nur jeweils an einer Einspannstelle zwei gegenüberliegende Dehnungsmeßstreifen befinden müssen, welche zu einer Halbbrücke geschaltet sind.

Aufgrund der bei dem erfindungsgemäßen Fühler vorliegenden Symmetrie lassen sich dann immer zwei geeignete Halbbrücken finden, welche zur Auswertung zu einer Vollbrücke zusammengeschaltet werden können. Ein Messen mit zu Vollbrücken zusammengeschalteten Dehnungsmeßstreifen bringt schon vom Prinzip

her eine Verbesserung des Signal/Rauschverhältnisses gegenüber dem Messen mit einzelnen Dehnungsmeßstreifen um den Faktor 4 und gegenüber Halbbrücken eine Verbesserung um den Faktor 2.

Obwohl bei dem erfindungsgemäßen Fühler mit Vollbrücken gemessen wird, werden, wie bereits mehrfach erwähnt, nur 20 Dehnungsmeßstreifen benötigt, während andere, bisher verwendete Anordnungen oft bis zu 32 Dehnungsmeßstreifen benötigen. Allein schon durch die Anordnung der Speichen und das Anbringen und Verschalten der insgesamt 20 Dehnungsmeßstreifen ist bereits im Fühlerkörper ein sehr hoher Grad an Entkopplung zwischen den einzelnen Komponenten erreicht, welche in der Größenordnung von etwa 100 liegt.

Um die Aufbereitung der von den zu Vollbrücken geschalteten Dehnungsmeßstreifen erhaltenen Spannungen zu vereinfachen, ist gemäß der Erfindung ein besonders einfaches Verfahren vorgesehen. Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform werden zur Signalaufbereitung alle von den zu Vollbrücken geschalteten Dehnungsmeßstreifen geliefert und von Null abweichenden Spannungen gemessen, wenn auf den Fühler keine Kräfte und Drehmomente einwirken.

Hierbei werden diese in der Größe temperaturabhängigen Fehlerspannungen zusammen mit der Temperatur in dem gesamten späteren Betriebstemperaturbereich erfaßt und in einem entsprechenden Speicher fortlaufend zugeordnet zu der jeweiligen Temperatur abgelegt. Bei dem späteren Meßbetrieb brauchen dann nur noch die zu der gemessenen Temperatur gehörenden Fehlerspannungen aus dem Speicher abgerufen zu werden und von den tatsächlich gemessenen, aktuellen Meßspannungen subtrahiert zu werden.

Bei Anwendung dieses Verfahrens ist nicht nur eine erhebliche Steigerung der Meßgenauigkeit und des Auflösungsvermögens erreicht, sondern zusätzlich können nicht zuletzt aufgrund der guten Entkopplung in dem Fühlerkörper sehr preiswerte und kleine Operationsverstärker verwendet werden. Aus diesem Grund kann die erforderliche Sensorelektronik leicht in oder an dem Meßkörper untergebracht werden. Diese Elektronik liefert die Meßsignale in digitaler, serieller Form, welche dann über einfache und damit preiswerte Kabel oder sogar drahtlos übertragen werden können.

Wenn besonders genaue Meßergebnisse gefordert werden, kann auch noch der durch die temperaturabhängige Änderung des  $k$ -Faktors der Dehnungsmeßstreifen entstehende Fehler ausgeschlossen werden, indem er entsprechend der vom Hersteller angegebenen Charge zusätzlich eingespeichert wird. Falls diese Charge nicht vorliegt, kann der Fehler in einem zusätzlichen Kalibriervorgang ermittelt werden. Entsprechend der gemessenen Temperatur wird dann dieser Fehler lediglich als multiplikativer Faktor in eine zusätzliche Kompensationsrechnung mit aufgenommen.

Nachfolgend wird die Erfindung anhand einer bevorzugten Ausführungsform unter Bezugnahme auf die Zeichnungen im einzelnen erläutert. Es zeigt

Fig. 1 schematisch in perspektivischer Darstellung eine bevorzugte Ausführungsform eines Kraft-Drehmoment-Fühlers;

Fig. 2a und 2b prinzipielle Darstellungen der in dem Fühler erzeugten Kräfte in Richtung der drei Achsen des kartesischen Koordinatensystems, und

Fig. 3a und 3b eine ähnliche prinzipielle Darstellung der in dem Fühler aufgrund von Biegeverformungen erzeugten Momente.

Wie aus der schematischen, perspektivischen Darstel-

lung der Fig. 1 zu ersehen, ist ein Kraft-Drehmoment-Fühler 1 gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung bezüglich der drei Achsen des kartesischen Koordinatensystems, d. h., der X-, Y- und der Z-Achsen, vollkommen symmetrisch ausgebildet. Hierbei besteht der Fühler aus zwei gleichartig ausgeführten, einteiligen Speichenrädern 10 und 10'. Jedes der beiden Speichenräder 10 (10') besteht aus je einem starren, zylindrischen Außenring 12 (12') und einer starren zentralen Nabe 11 (11'), welche in der bevorzugten Ausführungsform durch vier in einer Ebene liegende Speichen 14 bis 17 (14' bis 17') miteinander verbunden sind. Die vier Speichen 14 bis 17 (14' bis 17') sind in gleichen Winkelabständen, d. h. um 90° gegeneinander versetzt, angeordnet.

Theoretisch würden für eine Messung in jedem Speichenrad auch drei Speichen ausreichen, die dann unter einem Winkel von 120° angeordnet sind. Bei dieser Ausführung wäre dann jedoch keine vollständige Symmetrie mehr gegeben, was wieder im Hinblick auf die Signalaufbereitung ungünstig wäre.

Wie aus der Darstellung der Fig. 1 zu ersehen ist, weisen die Naben 11 und 11' der beiden Speichenräder 10 und 10' in Richtung der Fühler-Mittelnachse, d. h. in Richtung der Z-Achse, eine größere Höhe auf als die über die Speichen 14 bis 17 bzw. 14' bis 17' mit ihnen verbundenen Außenringe 12 und 12' auf. Hierdurch ist erreicht, daß die beiden Außenringe 12 und 12' des Fühlers 1 in einem wählbaren, jedoch ausreichenden Abstand voneinander angeordnet sind.

In dem Außenring 12 des Speichenrads 10 sind ebenfalls in gleichen Winkelabständen voneinander vier Bohrungen 18 mit Ansenkungen 18a ausgebildet. An den entsprechenden Stellen sind im Außenring 12' des anderen Speichenrads 10' vier Bohrungen 19' mit Innengewinde vorgesehen. In der in Fig. 1 wiedergegebenen Ausführungsform sind die Bohrungen 18 bis 19' in Verlängerung der Speichen 14 bis 17 bzw. 14' bis 17' vorgesehen. Entsprechende Bohrungen können jedoch in den beiden Außenringen 12 und 12' auch genau in der Mitte zwischen den Speichen vorgesehen sein, so daß unabhängig von der gewählten Anordnung der Bohrungen 18 bzw. 19' die Symmetrie der beiden Speichenräder erhalten bleibt. Die Bohrungen 18 sind so bemessen, daß in ihnen mit Spiel nicht näher dargestellte Schraubbolzen aufgenommen sind, welche in die mit Innengewinde versehenen Bohrungen 19' im Außenring 12' des Speichenrads 10' geschraubt sind. Hierdurch ist in einfacher Weise ein in dem Fühler integrierter, sehr wirksamer Überlastschutz geschaffen.

Wie aus Fig. 1 zu ersehen, sind auf allen Flächen 14a bis 17b (14'a bis 17'b) der entsprechenden Speichen 14 bis 17 (14' bis 17') Dehnungsmeßstreifen 20a und 20b (20'a und 20'b) aufgebracht. Die Oberflächen 14a bis 17b (14'a bis 17'b) liegen in sich senkrecht zur Fühler-Mittelnachse, d. h. zur Z-Achse, erstreckenden Ebenen, welche zueinander parallel verlaufen.

Da eine maximale Biegeverformung immer an den Einspannstellen der Speichen auftritt, welche als beidseitig fest eingespannte Balken betrachtet werden können, sind die Dehnungsmeßstreifen 20a, 20b, (20'a, 20'b) aus Gründen der Empfindlichkeit und der Temperatureffekte vorzugsweise in der Nähe der Nabe 11 (11') aufgebracht. Ferner ist noch jeweils ein weiteres Paar Dehnungsmeßstreifen 20c und 20d auf nicht näher bezeichneten, senkrechten Seitenflächen eines diagonalen Speichenpaares 14 und 16 des in Fig. 1 oberen Speichenrads 10 aufgebracht. Bei dem Fühler 1 können die

vier Dehnungsmeßstreifen 20c und 20d auf den senkrechten Seitenflächen jedes beliebigen diagonalen Speichenpaares eines der beiden Speichenräder 10 bzw. 10' aufgebracht werden.

Wie eingangs schon ausgeführt, kann zur Herstellung jedes der beiden Speichenräder 10 und 10' eine von gezogenem Stangenmaterial abgeschnittene Scheibe aus Aluminium oder Stahl verwendet werden, so daß in den radialen Richtungen die Materialeigenschaften praktisch als gleich anzusehen sind. Die endgültige Form der Speichenräder kann dann durch eine einfache Drehbearbeitung auf beiden Seiten der Scheiben sowie durch eine Fräsbearbeitung auf einer Scheibenseite erhalten werden. Für die Verbindung der Naben 11 und 11' sind dann in diesen noch eine Bohrung 11a bzw. eine Bohrung 11'a mit Innengewinde erforderlich. Ebenso sind noch die Bohrungen 18 bzw. 19' für den Überlastschutz sowie möglicherweise noch einige weitere Bohrungen für eine Montage des erfindungsgemäßen Fühlers beispielsweise an einem Roboter erforderlich.

Alle auf den vorstehend beschriebenen Fühlerkörper wirkenden Kräfte  $F_x$ ,  $F_y$  und  $F_z$  oder Momente  $M_x$ ,  $M_y$  und  $M_z$  werden in den Speichen 14 bis 17 (14' bis 17') in proportionale Biegeverformungen umgesetzt. Die Biegeverformungen, welche durch die Kräfte  $F_x$ ,  $F_y$  und  $F_z$  und durch die Momente  $M_x$ ,  $M_y$  und  $M_z$  hervorgerufen werden, sind in prinzipiellen Darstellungen in den Fig. 2a und 2b bzw. 3a und 3b dargestellt.

Zu jedem denkbaren Belastungsfall lassen sich immer bestimmte Speichen angeben, welche sich aufgrund der Belastung verbiegen; die daraus resultierende Biegeverformung ist immer erheblich größer als die durch Zug oder Druck verursachte Dehnung oder Stauchung der übrigen Speichen.

Aus Gründen der Meßempfindlichkeit ist die Auswertung von Biegeverformungen  $e_b$  erheblich günstiger als die Auswertung von Zug- und Druckverformungen  $e_d$ , da für einen beidseitig eingespannten Balken der Länge  $l$  mit einem quadratischen Querschnitt  $h^2$  bei gleicher Belastung gilt:

$$e_b/e_d = 3(l/h)$$

Daher wird bei Vorsehen einer würfelförmigen Speichenform, d. h. bei Speichen, deren Länge, Breite und Höhe gleich groß ist, eine dreimal höhere Meßempfindlichkeit für die Biegeverformung als für die Zugverformung erhalten. Aufgrund der speziellen Ausbildung des Fühlerkörpers ist erreicht, daß immer bestimmte Speichen die zu messende Belastung als Biegebeanspruchung aufnehmen.

Von den insgesamt 20 bei dem Fühler aufgebrachten Dehnungsmeßstreifen werden sieben Spannungen ( $U_1$  bis  $U_7$ ) geliefert, welche 500- bis 1000fach verstärkt werden und dann in digitale Werte umgewandelt werden müssen. Eine solche hohe Verstärkung kann zu Problemen führen, wenn die Verstärker insbesondere hinsichtlich der Temperaturdrift keine weitgehend idealen Eigenschaften haben. Jede Fehlerspannung des Verstärkers würde dann, mit dem Verstärkungsfaktor multipliziert, an dessen Ausgang anliegen. Insbesondere die Fehlerspannungen, welche sich mit der Temperatur der Anordnung ändern, verfälschen das Meßergebnis.

Bisher sind für die Auswertung der von den Dehnungsmeßstreifen gelieferten Spannungen zwei unterschiedliche Wege beschritten worden. In dem einen Fall wird nur ein teurer Spezialverstärker verwendet, vor welchem ein Multiplexer angeordnet ist, der die von den

Dehnungsmeßstreifen abgenommenen Spannungen nacheinander auf den Verstärkereingang durchschaltet. Nach Auswerten der Einschwingzeit auf den Endwert wird die Ausgangsspannung von einem A/D-Wandler weiterverarbeitet. Das Problem aufgrund einer Temperaturdrift läßt sich hierbei nur durch ein gesondertes Erfassen der gerade vorliegenden Fehlerspannung lösen, indem diese jeweils von den anderen Meßwerten subtrahiert wird.

Theoretisch verstößt dieses Verfahren jedoch gegen das Abtasttheorem, weil die von den Dehnungsmeßstreifen gelieferten Spannungen nicht vor dem Multiplexer entsprechend der jeweiligen Abtastfrequenz tießpaßgefiltert werden können. Dies kann gerade beim Messen von schwingenden Systemen zu erheblichen Meßfehlern führen.

Außerdem muß der Spezialverstärker eine hohe Bandbreite aufweisen, damit er schnell auf den jeweiligen Signalpegel einschwingen kann. Dies wiederum hat jedoch einen deutlich erhöhten Rauschpegel zur Folge. Mithin wirken sich auch geringste Fehler im Multiplexer, die durch den Verstärkungsfaktor vervielfacht werden, als Meßfehler aus.

Bei dem anderen eingeschlagenen Weg ist für jede mittels eines Dehnungsmeßstreifens gewonnene Spannung ein eigener, äußerst driftarmer und somit teurer Einzelverstärker vorgesehen, wobei die Ausgangsspannungen der Einzelverstärker über einen Multiplexer dem A/D-Wandler zugeführt werden.

Dadurch ist eine analoge Filterung jedes Kanals möglich. Nachteilig sind auch hier die sehr hohen Bauelementkosten, der hohe Strom- und der große Raumbedarf.

Bei der in Verbindung mit dem Kraft-Drehmoment-Fühler vorgesehenen Signalaufbereitung werden alle von Null abweichenden Spannungen, welche der Fühler ohne eine Kraft- oder Momenten-Beaufschlagung liefert, als Fehlspannungen eingestuft, deren Größe temperaturabhängig ist. Alle diese Fehlspannungen werden in einem Auswerterechner erfaßt und in dem Rechner in Form einer Liste gespeichert. Als zusätzliche Meßgröße wird noch die Temperatur erfaßt, die im Fühlerkörper herrscht, in welchem auch die Verstärkerelektronik untergebracht ist.

Der gesamte Fühlerkörper mit den in ihm untergebrachten Verstärkern wird nunmehr in einem dem späteren Einsatz entsprechenden Betriebstemperaturbereich einem sogenannten Fehlerspannungs-Erfassungszyklus unterworfen; bei einem solchen Zyklus werden alle Ausgangsspannungen der Verstärker zusammen mit der sich langsam ändernden Temperatur fortlaufend erfaßt und gespeichert.

Bei dem späteren Betrieb müssen dann nur noch die zu der gerade vorliegenden Temperatur gehörenden Fehlerspannungen aus dem Digitalspeicher abgerufen und von den tatsächlichen, aktuellen Meßspannungen subtrahiert werden, wodurch dann der exakte Meßwert erhalten wird.

Mit diesem vorteilhaften Verfahren lassen sich dann alle additiven Meßfehler in dem gesamten Betriebstemperaturbereich kompensieren. Es verbleibt dann nur noch der Fehler aufgrund der temperaturabhängigen Änderung des k-Faktors der Dehnungsmeßstreifen. Da dieser Einfluß aber im allgemeinen auf jeder Dehnungsmeßstreifen-Charge angegeben wird, kann er, da die Temperatur ständig gemessen wird, als multiplikativer Faktor in einer zusätzlichen Kompensationsrechnung eliminiert werden.

Die Ausgangsspannungen der einzelnen Verstärker werden über einen Multiplexer, welcher einen zusätzlichen Kanal für den Temperaturfühler aufweist, an den A/D-Wandler angelegt. Bei diesem Verfahren, das auch als digitale Temperaturdriftkompensation bezeichnet werden könnte, können eine Vielzahl von Operationsverstärker verwendet werden, die hinsichtlich Verfügbarkeit, Rauschen, Spannungsversorgung, Raumbedarf und nicht zuletzt hinsichtlich des Preises optimal ausgewählt werden können, da ihr Temperaturdriftverhalten praktisch keine Rolle mehr spielt.

Bei der technischen Realisierung kommt diesem Verfahren sehr entgegen, daß nur insgesamt sieben Dehnungsmeßstreifen-Spannungen zu erfassen sind, und der achte Multiplexerkanal zur Temperaturerfassung verwendet werden kann. Mit einem diese Gesichtspunkte berücksichtigenden Versuchsaufbau wurden hervorragende Werte bezüglich des Rauschverhaltens nachgewiesen, wobei die gesamte Elektronik nur noch mit einer Spannung von 5 V versorgt werden mußte.

Mit der Versuchsanordnung wurde eine Auflösung von 1 : 2000 bei einer 3dB-Grenzfrequenz von 1kHz für die Meßsignale des erfindungsgemäßen 6D-Kraft-Drehmoment-Fühlers bei sehr niedrigen Erstehungskosten erreicht. Ebenso konnte das Bauvolumen für die Elektronik um etwa den Faktor 100 reduziert werden.

Hierzu 3 Blatt Zeichnungen

30

35

40

45

50

55

60

Fig. 2a

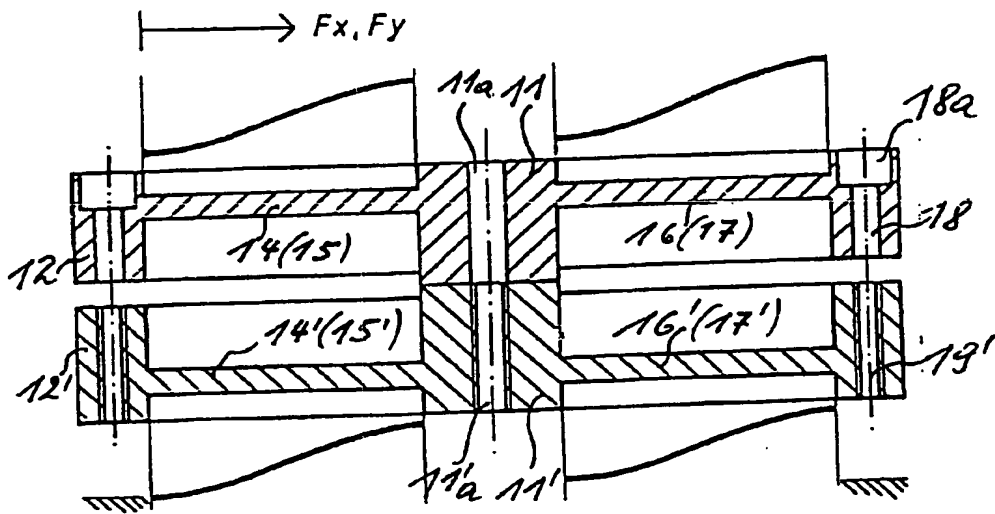


Fig. 2b

